

УДК 655.225.6:773.92

С. К. Грудю, аспирант (БГТУ);

С. А. Барташевич, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИЕЙ УЗ-КОЛЕБАНИЙ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ СШИВКУ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ

В статье приведен способ получения цифровой флексографской фотополимерной печатной формы, в котором после дополнительного экспонирования производят облучение ультразвуком. Предложено ультразвуковое облучение, которое осуществляется позонно с акустическим контактом между ультразвуковым рабочим инструментом и печатной формой. Представленная математическая модель позволяет определить эффективность влияния технологических параметров ультразвукового облучения как с учетом воздействия свойств облученного материала, так и времени излучения.

The article presents the way of reception digital flexographic photopolymeric printing form, in which after additional exposure make irradiation by ultrasound. Proposed ultrasonic irradiation, which is carried out in a certain zone with acoustical contact between the ultrasonic working tool and the printing form. And the presented mathematical model allows to define efficiency of influence of technological parameters of ultrasonic irradiation, as taking into account influence of properties of an irradiated material, and time of the radiation.

**Введение.** В настоящее время флексография — это способ высококачественной растровой печати с применением эластичных фотополимерных печатных форм (ФПФ). Необходимость повышения качества печати, совместимость флексографских печатных форм со всеми типами красок и стойкость их к набуханию являются причинами, по которым предъявляют требования к свойствам и использованию различных формных пластин. С дальнейшим развитием флексографии появляются новые требования к процессам эксплуатации и получения печатных форм, и их тиражестойкости.

**Основная часть.** Важнейшими характеристиками печатной формы являются толщина, жесткость и твердость, которые тесно взаимосвязаны. Твердость одного и того же материала формы при уменьшении его толщины увеличивается. В то же время разные материалы одинаковой толщины могут иметь разную жесткость. Более тонкие и жесткие печатные формы лучше передают растровую точку, но с ними труднее работать, особенно при наладке печатной машины. Это особенно важно для участков печатной формы с малым процентом растровой структуры. В целом, чтобы получить высококачественную печатную продукцию, необходимо согласовать между собой определенные факторы, главным из которых является жесткость растровой точки печатной формы и ее тиражестойкость. Для этого используют разные типы формных пластин при изготовлении печатных форм.

Свойства флексографских печатных форм зависят прежде всего от вида материала, из которого они произведены [1]. Существует два типа формного материала для изготовления флексографских форм: эластомеры и эласто-

мерный материал со специальными свойствами (фотополимерный). Широкое распространение в настоящее время получили фотополимеризующиеся пластины в качестве формного материала для флексографского способа печати.

Как правило, фотополимерные формы изготавливаются двумя способами: аналоговым и цифровым [2]. Основными преимуществами цифрового способа получения и широкого его распространения является то, что данный процесс характеризуется высокой точностью, так как каждая пластина является первой оригинальной копией, изготовленной на основе одних и тех же цифровых данных.

Недостатком цифрового получения фотополимерных ФПФ является то, что степень фотохимической реакции полимеризации уменьшается с увеличением глубины растровой структуры. Эта особенность фотохимической реакции, а также многофакторность традиционного технологического процесса получения ФПФ не позволяет повысить физико-механические и эксплуатационные свойства за счет более полной полимеризации и дополнительной сшивки полимерных цепочек.

Имеющийся на рынке фотополимерных материалов большой ассортимент печатных пластин по комплексу свойств не всегда соответствует необходимым эксплуатационным требованиям. Поэтому широкое применение в настоящее время получили различного рода способы модификации фотополимерных материалов.

Проведенный авторами в работе [3] анализ способов модификации эксплуатационных свойств фотополимерного материала пластин показал, что оптимальным вариантом является физико-химическая модификация, которая на-

правленно влияет на изменение как структуры, так и свойств полимерной композиции [4]. Одним из вариантов данной модификации является сшивка полимерных цепочек. Сшивка осуществляется на различных стадиях синтеза полимера, а также при обработке готового изделия. Существует несколько способов проведения процессов дополнительной сшивки полимеров, наиболее эффективным и разработанным из которых является ультразвуковое облучение. Ультразвуковые колебания – это средство активного воздействия на структуру и свойства полимерных материалов, на скорость и качество химических реакций в этих материалах.

Авторами работы [5] был предложен способ получения ФПФ, который включает стандартные операции их изготовления [2], где после дополнительного экспонирования производят операцию ультразвукового облучения с частотой 35–40 кГц, плотностью энергии 1,2 Вт/см<sup>2</sup> в течение 15–20 мин.

Согласно проведенной ИК-спектроскопии исследуемых фотополимерных пластин фирмы Du Pont марки Cyrel DPU (для цифрового экспонирования), в работе [3] было установлено, что основу фотополимерной композиции составляет соединение, которое представляет собой высокомолекулярный неопределенный углеводород, молекулы которого содержат большое количество двойных  $\pi$ -связей, являющийся полимером изопрена (каучуком).

Образование дополнительных поперечных связей на начальной стадии ультразвукового воздействия приводит к увеличению молекулярной массы каучука [6]. При дальнейшем воздействии с возрастанием числа поперечных связей образуется прочная пространственная структура. Данный процесс образования связей определяет изменение физических свойств и структуры каучука и зависит от химического строения макромолекул облучаемого вещества, от характера надмолекулярных образований, а также эффективности ультразвукового воздействия.

Очевидно, что процессы полимеризации в поле ультразвуковых волн возникают в результате появления свободных радикалов. Процесс разрыва «слабых»  $\pi$ -связей полимеризованной частицы под действием ультразвука впервые изложен в работе [7]. По химическому строению молекула каучука представляет собой длинную тонкую цепочку, звенья которой могут вращаться не беспрепятственно в любом направлении, а ограничено – только вокруг осесимметричных  $\sigma$ -связей. Как показали экспериментальные исследования, разрыв связей в поле ультразвуковых волн сопровождается образованием длинноцепных радикалов в различных местах молекулы каучука. Данные радика-

лы обладают способностью связываться за счет возникших свободных валентностей на концах оборванных полимерных цепей.

Для того чтобы заставить молекулы мономера соединиться друг с другом, их необходимо предварительно возбудить, т. е. привести их в такое состояние, когда они становятся способными в результате раскрытия двойных связей к взаимному присоединению. Это требует затраты определенного количества энергии или участия химического катализатора. В процессе полимеризации в каучуке раскрываются обе его двойные связи, а в элементарном звене полимера двойная связь возникает на новом месте, т. е. свободные валентности средних углеродных атомов смыкаются и образуют двойные связи в середине молекул, ставших теперь уже звеньями растущей цепи. Затем к образовавшейся частице присоединяется следующая молекула каучука. Подобный процесс надмолекулярного образования продолжается в течение всего процесса полимеризации.

За счет этого процесса можно добиться дополнительной сшивки звеньев ФПФ, что позволяет улучшить ее физико-механические свойства [8]. Следует отметить, что особенно сильно воздействия энергией ультразвуковых колебаний на процесс полимеризации является то, что при этом молекулы исходного вещества или веществ, соединяющихся между собой, образуют макромолекулы исходного полимера и не способствуют возникновению при этом каких-либо других веществ.

На основании приведенных рассуждений были определены энергетические пределы воздействия ультразвуковой энергии согласно условию (1):

$$266 \text{ кДж/моль} \leq \bar{E} \leq 348 \text{ кДж/моль}. \quad (1)$$

Для определения зависимости выделяемой энергии при облучении ультразвуком фотополимерной композиции (ФПК) печатных форм в работе [3] была получена формула (2)

$$\bar{E} = \frac{1}{2} M A^2 \omega^2, \quad (2)$$

где  $M$  — молярная масса вещества, г/моль;  $A$  — амплитуда колебаний, мкм;  $\omega$  — частота колебаний, кГц.

Однако представленную зависимость (2) невозможно использовать для моделирования технологии процесса модификации фотополимерных флексографских печатных форм с целью повышения эффективности воздействия ультразвуковых колебаний на облучаемую рабочую поверхность формы и снижения энергоемкости этого процесса, поскольку данная формула:

– не учитывает свойства облучаемого ультразвуком материала;

- количественно не определяет размеры энергетического воздействия на облучаемый материал, так как учитывает выделяемую энергию только за один период колебаний, а не за весь цикл ультразвукового воздействия;

- не показывает влияние акустического контакта на эффективность ультразвукового облучения.

Кроме того, упомянутый способ [4] не учитывает величины энергетического ультразвукового воздействия на участки с различной величиной растровой точки.

Для устранения перечисленных недостатков авторами данной статьи был предложен способ получения цифровых фотополимерных ФПФ (заявка № а20130009; заявл. 03.01.2013), в котором ультразвуковое облучение осуществляется при акустическом контакте между инструментом и печатной формой, не превышающем  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ . Величину позонного акустического контакта инструмента с печатной формой определяют как произведение среднего значения относительной площади растровой точки каждой зоны на максимальную величину контакта.

Способ изготовления флексографских фотополимерных печатных форм реализуется в следующей последовательности:

- исходя из анализа цифровых файлов каждой цветоделенной печатной формы, определяется количество зон, подвергаемых УЗ-излучению, причем величина зоны выбирается таким образом, чтобы растровые структуры, находящиеся в данной зоне были близки по относительной площади к растровой точке;

- для достижения максимальной эффективности воздействия ультразвуковых колебаний на облучаемую поверхность формы и исключения повреждения растровой структуры формы площадь инструмента ультразвукового облучения выбирается равная облучаемой зоне, а величина усилия акустического контакта инструмента с зоной печатной формы определяется из среднего значения относительной площади растровых точек этой зоны путем умножения последней на максимальную величину акустического контакта по формуле (3):

$$F = \Delta S \frac{P_{\max}}{100}, \quad (3)$$

где  $\Delta S$  — среднее значение относительной площади растровых точек, %;  $P_{\max}$  — максимальное значение величины акустического контакта,  $\text{Н/мм}^2$ .

**Математическое моделирование.** Для эффективного воздействия УЗ-колебаний на облучаемую среду необходимо учитывать не только удельную плотность облучаемой энергии и времени облучения, но и наличие акусти-

ческого контакта ультразвукового инструмента с облучаемой средой, а также величину усилия прижима инструмента к облучаемой среде.

Смысл наличия акустического контакта между ультразвуковым инструментом и облучаемой средой необходим для снижения непроеизводительных потерь ультразвуковой энергии. Эти потери объясняются следующими механизмами воздействия ультразвука с воздушной средой.

При взаимодействии ультразвуковых волн с воздушной средой первые теряют свою энергию вследствие преодоления вязкости воздуха, т. е. от внутреннего трения частиц воздуха при их движении, вызываемом прохождением волны [9], а также вследствие теплопроводности, поскольку она нарушает нормальный характер распространения ультразвука и приводит к доп. полному поглощению энергии за счет теплообмена.

На молекулярно-кинетическом уровне данный процесс можно объяснить дисперсией скорости звука.

Дисперсия скорости звука (ДСЗ) — это зависимость фазовой скорости монохроматических звуковых волн от их частоты [10]. Дисперсия скорости звука связана с физическими свойствами промежуточной и самой облучаемой среды и возникает, когда действие акустической волны приводит к неравномерному состоянию среды, возбуждая внутренние степени свободы.

В твердых телах, в данном случае ФПК печатных форм, дисперсия скорости звука появляется тогда, когда ультразвуковая акустическая волна взаимодействует с какими-либо видами внутренних возбуждений и под ее действием возникает изменение состояния электронов, а следовательно, и структуры облучаемого материала.

Для воздушной среды внутренними степенями свободы являются колебательные и вращательные движения молекул воздуха. Представим молекулу газа как материальную точку, имеющую внешние и внутренние степени свободы движения. Внешние степени свободы реализуются в трех взаимно перпендикулярных друг к другу направлениях, а внутренние — это колебания молекулы относительно других молекул. Кроме того, такая молекула может также вращаться относительно своего центра инерции. Передача энергии внешних степеней свободы в многоатомных газах на внутренние степени свободы под действием распространяющейся ультразвуковой волны представляет собой пример релаксационного процесса. Время, в течение которого происходит перераспределение энергии между внешними и внутренними степенями свободы, называется временем релаксации  $\tau$  [10].

За полный период  $T$  материальная точка (молекула газа) под действием звукового давления совершает некоторую работу. Затрачиваемая на эту работу энергия ультразвуковой волны идет на нагревание газа, чем вносится добавочное поглощение ультразвука. Это поглощение называют молекулярным поглощением. При этом дисперсия скорости звука сопровождается повышенным поглощением ультразвука по сравнению с влиянием вязкости и теплопроводности воздушной среды.

Следовательно, для эффективности ультразвукового облучения не должно быть воздушного зазора между поверхностью рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы и поверхностью фотополимерной печатной формы, поскольку это приводит к добавочному поглощению ультразвуковой энергии, теряемой на выделение тепла.

Поэтому необходимо иметь непосредственный контакт поверхности рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы с поверхностью печатной формы и для определения величины этого контакта следует провести математическое моделирование процесса ультразвукового воздействия на дополнительную шивку ФПК.

С одной стороны, увеличение контакта с фотополимерным слоем позволяет снизить потери ультразвуковой энергии в переходной зоне и тем самым повысить эффективность процесса облучения.

С другой стороны, молекулы каучука, хотя и имеют линейное строение, не вытянуты в линию, а многократно изогнуты, как бы свернуты в клубки. При наложении определенных деформаций растягивания / сжатия такие молекулы изменяют свое положение, образец каучука от этого становится длиннее. Если же каучук растягивать или сжимать с достаточно большой силой, то произойдет не только вытягивание молекул, но и смещение их относительно друг друга — образец каучука может разрушиться. В случае сжатия молекул каучука уменьшается межмолекулярное расстояние, что не позволяет УЗ-колебаниям передать энергию во внутренние слои материала (ультразвуковая волна гасится).

С учетом того что воздействие на молекулы каучука происходит уже на готовой печатной форме, чрезмерный прижим рабочего инструмента к ФПФ может привести к повреждению (заломам) растровой структуры. Это в результате вызывает брак и невозможность использования данной формы в флексографской печати.

Для того чтобы количественно оценить поглощение ультразвука, в зависимость (2) необходимо ввести коэффициент  $\alpha$ , учитывающий

поглощение ультразвука и определяемый как обратная величина того расстояния  $x_l$ , на котором амплитуда звуковой волны уменьшается в  $e$  раз [6]:

$$\alpha = \frac{1}{x_l}. \quad (4)$$

Простейший закон затухания амплитуды с учетом коэффициента поглощения для упругих сред можно представить формулой (5):

$$A = A_0 \frac{1}{e^{\alpha x}}, \quad (5)$$

где  $A_0$  — максимальная амплитуда звуковой волны, мкм.

Из этого закона видно, что чем больше коэффициент поглощения, тем на меньшем расстоянии убывает амплитуда волны до указанной величины.

Определим влияние усилия прижима на изменение амплитуды. Его величина выражается по формуле (6):

$$x_{сж} = -\frac{P}{c}, \quad (6)$$

где  $x_{сж}$  — величина сжатия материала, м;  $P$  — усилие прижима, Н;  $c$  — жесткость материала, кг/с<sup>2</sup>, определяемая из выражения (7):

$$c = \frac{E_{упр} S}{x_{сж}}, \quad (7)$$

где  $E_{упр}$  — модуль упругости, МПа;  $S$  — облучаемая площадь поверхности материала, м<sup>2</sup>.

Выразим энергию ультразвуковой волны, подставив полученные выражения (5) и (6) в зависимость (2). Принимая во внимание, что число колебаний определяется как  $N = ft$ , после упрощения получим формулу (8):

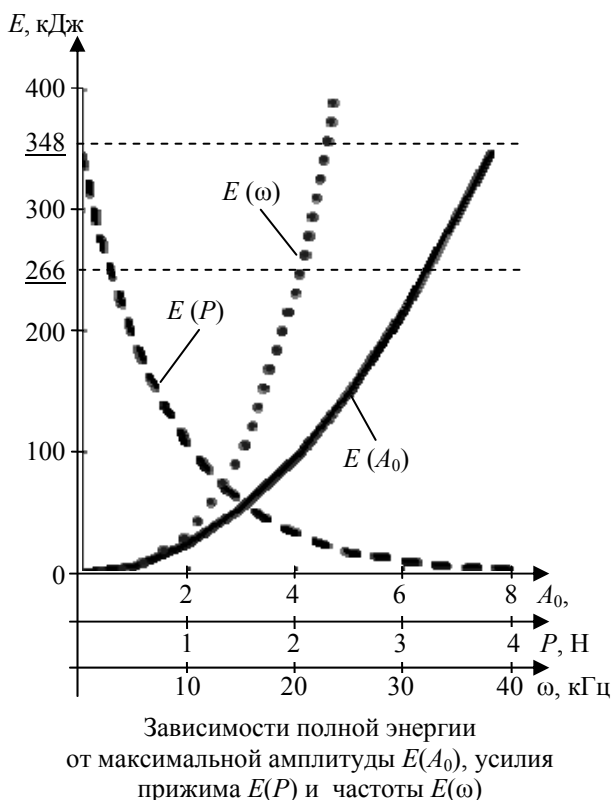
$$\bar{E} = \frac{1}{2} M N A_0^2 \omega^2 e^{-2\alpha x - \frac{2\alpha P}{c}}. \quad (8)$$

Полученное математическое выражение позволяет моделировать процесс ультразвуковой модификации ФПФ и оптимизировать основные технологические параметры процесса. Используя математическую зависимость (8), можно исследовать влияния усилия прижима  $E(P)$ , частоты колебаний  $E(\omega)$  и максимальной амплитуды колебаний  $E(A_0)$  на выделяемую энергию при облучении ультразвуком. Кроме того, данная формула позволит определить расчетные граничные значения переменных  $P$ ,  $\omega$  и  $A_0$ , чтобы полученная зависимость удовлетворяла энергетическому условию (1).

Для этого необходимо подставить численные значения в зависимость (8), где в качестве

переменной величины служит  $P$ ,  $\omega$  или  $A_0$ , а все остальные величины являются постоянными.

На рисунке показано, что значение полной энергии возрастает в зависимости от амплитуды по параболической кривой с учетом коэффициента поглощения и свойств материала и лежит в диапазоне 0,6–0,8 мкм. С повышением частоты колебаний происходит возрастание полной энергии по гиперболической зависимости. Величина диапазона используемой частоты, как видно из графика, лежит в пределах 20–25 кГц.



Согласно рисунку, с увеличением значения величины прижима  $P$ , происходит уменьшение передачи энергии во внутренние слои фотополимерного материала, так как ультразвуковая волна гасится. Поэтому оптимальное усилие прижатия рабочего инструмента лежит в небольшом пределе 0–0,2 Н, т. е. когда усилие прижатия отсутствует или очень мало.

**Заключение.** Авторами в данной работе предложен способ получения цифровых флексографских фотополимерных печатных форм, который позволяет снизить энергоемкость процесса их получения за счет позонной обработки облучаемой поверхности флексографской печатной формы и повышения эффективности УЗ-воздействия на облучаемый материал.

Кроме того, воздействие ультразвука на растровую структуру материала в светах по-

вышает ее жесткость, что, в свою очередь, исключает возможность заломов, растискивания, повреждений и тем самым повышает тиражестойкость ФПФ.

Проведенное математическое моделирование процесса воздействия энергией УЗ-колебаний на дополнительную сшивку фотополимерных печатных форм позволяет определить и рассчитать необходимые значения основных параметров ультразвукового воздействия, используя их в дальнейшем при экспериментальном исследовании.

### Литература

1. Аверьянова Н., Токманцев Д. Фотополимерные пластины — история и реальность // *Pakkograft*. 2000. № 5. С. 64–66.
2. Надинова Е. Б. Цифровые технологии в формных процессах глубокой и флексографской печати: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУП, 2006. С. 50–66.
3. Медведев С. В., Барташевич С. А., Шашок Ж. С. Повышение эксплуатационных характеристик флексографских фотополимерных печатных форм воздействием ультразвуковых колебаний // *Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия*. 2011. С. 61–66.
4. Назаров В. Г. Поверхностная модификация полимеров: монография. М.: Изд-во МГУП, 2006. С. 9–54.
5. Способ получения цифровых фотополимерных флексографских печатных форм: полож. решение по заявке Респ. Беларусь, МПК G 03 F 7/20 / С. А. Барташевич, С. В. Медведев, В. С. Юденков; заявитель Белорус. гос. технолог. ун-т. № а 20110679; заявл. 17.05.11; опубл. 07.09.12 // *Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности*. 2012. № 3. С. 170.
6. Крыжановский В. К. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Профессия, 2005. 248 с.
7. Эльпинер И. Е. Биофизика ультразвука. М.: Наука, 1973. 335 с.
8. Грудо С. К., Барташевич С. А., Русак Е. В. Особенности выбора и расчета акустических параметров ультразвуковой системы процесса модификации фотополимерных печатных форм // *Труды БГТУ*. 2012. № 9 (156): Издат. дело и полиграфия. С. 37–42.
9. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. 2-е изд.; перевод с нем. под ред. В. С. Григорьева. М.: Иностран. лит., 1957. 727 с.
10. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энцикл., 1979. С. 257–263.

Поступила 24.04.2015